神经电生理及脑成像技术在汉语二语声调习得领域的应用——对汉语教学的启示*

陆灵犀　晋杨平

（北京语言大学语言认知科学学科创新引智基地，北京，100083）

摘要： 声调习得作为汉语二语习得的主要难点之一，一直是汉语教学研究的关键领域。近年来，随着神经电生理及脑成像技术的应用，汉语二语声调习得的实证研究有了新的进展。首先，行为及神经层面的研究表明，汉语学习者可以通过短期声调训练或课堂学习形成类似母语者的声调范畴感知模式，但是较难形成神经层面的音位表征。其次，汉语学习者在声调习得上存在困难，主要表现为利用声调线索辨别词汇的能力较弱，可通过知觉训练和手势教学法有效促进学习者的声调感知。最后，在接受汉语教学训练的过程中，成人汉语学习者的大脑皮质具有一定的脑神经结构及功能可塑性。本文通过梳理行为测量、脑电图、脑磁图和功能磁共振成像技术在汉语二语声调习得领域的实证证据，深入探讨了汉语教学中声调习得领域的关键问题和未来的研究方向。

关键词： 汉语二语习得　声调感知　脑电/磁图　功能磁共振成像　神经可塑性

分类号： B842

1. 引言

声调作为汉语区别于其他语言的重要特征之一，也是汉语作为第二语言习得的主要难点（Shen，1989；林焘，1996）。汉语声调由音高构成，根据相对音高走势（音高轮廓）分为阴平、阳平、上声和去声，具有区别词语音形式的作用，在词义通达方面有非常重要的作用。一个语音形式加上不同的调类（如 shū 书，shú 熟，shǔ 属，shù 树）对应不同的字形和意义。受母语迁移的影响，无论是以非声调语言为母语的学习者，如英语、韩语等，还是以声调语言为母语的学习者，

* 基金项目： 北京市社会科学基金项目（21YYC010）

通讯作者，陆灵犀，E-mail: lingxilu@blcu.edu.cn

收稿日期：2024 年 12 月 23 日

如泰语、越南语等，都在汉语声调习得方面有一定的困难（韩明，2005；高玉娟等，2006；程潇，2010；谭董妍，2010；毕芳，2011）。

目前对汉语二语声调习得的探讨主要以行为研究为主，集中在考察学习者母语背景对声调感知和产出的影响（Peng，2010；陈默，2011；易斌等，2012；王燕，2016；Xu，2016；张锦玉，2019）和学习者对不同调类的感知顺序及范畴化加工（Hallé et al.，2004；张林军，2010a、2010b；王韫佳等，2011；姚勇等，2012；王功平，2015），神经层面的实证研究仍为少数。近年来，随着神经电生理和脑成像技术的发展，探究声调感知背后的神经机制成为新兴热点（吴倩等，2018；Klein et al.，2001；Gandour et al.，2003；Krishnan et al.，2005；Chandrasekaran et al.，2007；Bidelman & Lee，2015）。常用的脑科学研究技术如脑电图（electroencephalography，EEG）、脑磁图（magnetoencephalography，MEG）、功能磁共振成像（functional magnetic resonance imaging，fMRI）等可以帮助汉语教学者从神经层面了解学习者声调感知和习得过程的大脑活动。

为了深入探讨脑科学技术在汉语二语声调习得领域的应用，本文梳理了近年来汉语学习者声调范畴化感知的实证研究，并从汉语学习者声调感知困难这一角度归纳知觉训练与手势教学方法的效果，总结声调感知训练背后的神经可塑性问题，最后展望汉语二语声调习得领域的未来研究方向。

2. 汉语学习者的声调范畴感知模式的发展及神经表征

2.1 早期声调范畴感知的形成

范畴感知（Categorical Perception）指人们能够将连续的语音刺激感知为离散的、非连续性的若干类别（例如音位），并且能较好地区分跨类别的刺激，但不能较好地区分同一类别的刺激，如汉语母语者可以很好地区分阴、阳、上、去四个调类而不太关注相同调类的绝对音高差异（Liberman et al.，1957；Studdert-Kennedy & Shankweiler，1970；Kuhl，2004；张林军，2010a）。研究声调范畴感知为考察母语者的声调感知特点进而探索学习者的声调感知困难提供了很好的切入点（Shen & Froud，2016）。

新生儿在生命的第一年发生知觉重构（从普遍言语知觉转为具体言语知觉，如母语），对声调的知觉重构发生在 6 到 9 个月左右（Mattock，2006），范畴感知能力随着声调知觉的发展而变化（Mattock，2008）。6 岁左右的汉语母语儿童已经在行为层面形成类似成人的声调范畴知觉（Chen，2016；Ma et al.，2021；Feng & Peng，2022），10 岁儿童在神经层面上也在声调范畴间与范畴内的感知中表现出明显的脑电失匹配负波（Mismatch Negative，MMN），即形成了类似成人的声

调音位表征（Zhang et al.，2012）。由此可见，声调范畴感知能力通过生命早期的母语经验积累而快速发展并趋于成熟。

2.2 成人汉语学习者的声调范畴感知

与母语者相比，对没有声调语言经验的成人来说形成声调范畴知觉较为困难。成人汉语学习者主要通过声调训练和汉语课堂学习来提升声调感知能力（Wang，1999；Wang & Kuhl，2003；Wong & Perrachione，2007；张林军，2010a、2010b；Zhao & Kuhl，2015；Shen，2016；Yu et al.，2019）。首先，短期声调训练能够显著提高成人汉语学习者声调辨别的行为表现（Wang，1999；Wang & Kuhl，2003；Wong & Perrachione，2007；Zhao & Kuhl，2015）。例如，在经过两周的声调知觉训练后，美国汉语学习者的声调识别成绩能够提升 21%（Wang et al.，1999）；并且这种声调训练的效果没有严格的年龄关键期限制（Wang & Kuhl，2003）。有趣的是，声调习得与学习者本身的音乐经验也存在一定的关系：有音乐经验的英语母语者对声调变化更为敏感（Zhao & Kuhl，2015），且音乐经验有利于促进汉语初学者对音高轮廓的感知（Wong & Perrachione，2007），但是音乐经验并不能促进词汇声调范畴的形成（Chan & Leung，2020）。

此外，成人汉语学习者也能通过课堂学习提高声调感知能力，或者形成类似母语者的声调范畴感知模式（张林军，2010a、2010b；Shen，2016；Yu et al.，2019）。张林军（2010a）考察在课堂学习后不同汉语水平的日本留学生对汉语声调的范畴化感知，发现初学者与无经验者相比声调范畴化知觉得到明显提升；中级学习者的范畴感知模式与母语者接近，但仍然无法忽视范畴内刺激的物理属性差异，即精细化感知能力不足。这一结果在王韫佳等（2011）对韩国留学生的范畴化研究中也得到了支持。Yu 等人（2019）指出，母语背景对汉语初学者声调感知有重要的影响：有声调语言经验的学习者（如越南、泰国学习者）与无声调语言经验的学习者（如印尼、吉尔吉斯斯坦学习者）相比，在声调连续体辨别任务中的反应时更短，且范畴感知能力更强，可见声调语言经验对范畴化知觉的促进作用。另一方面，也有研究不支持这一结论，如张林军（2010b）在韩国（语调语言）、日本（音高重音语言）、泰国（声调语言）三种不同母语背景的汉语初学者中均发现了通过课堂学习形成的类似母语者的声调范畴感知模式，并且三国留学生的范畴化程度没有显著差异，即声调母语经验并不能促进新范畴的建立。因此，成人汉语学习者声调语言经验对范畴化知觉的作用问题还需进一步探究。

2.3 范畴感知模式的神经表征

通过短期声调训练和长期自然课堂学习的成人汉语学习者尽管在行为上表现出类似母语者的声调识别模式，但是仍然很难形成在神经层面的自动化音位表征（Zhang & Wang，2007；Shen & Froud，2018；Yu et al.，2019）。张林军（2013）利用双耳分听范式的研究发现，部分已经建立起较好声调范畴模式的汉语学习者无法表现出类似母语者的半球偏侧化加工模式。张林军（2013）指出，形成声调范畴感知并不代表学习者可以利用声调处理词汇，只有将声调与对应的词条进行编码并储存于长时记忆中（形成音位表征），学习者才能利用声调线索进行词汇辨别，从而利用声调进行词义通达。

类似的，Shen & Froud（2016）在早期声调连续体听辨实验中也发现，汉语学习者能够在行为上形成与母语者类似的范畴感知模式，但脑电实验显示，母语者对声调范畴间偏差刺激产生更强的 MMN 和 P300 响应，而学习者对范畴内和范畴间偏差刺激的 MMN 和 P300 响应无显著差异（Shen & Froud，20185）。也就是说，在早期的前注意加工阶段（对应 MMN 成分，刺激起始点后 100 至 250 ms）和稍晚的注意加工阶段（对应 P300 成分，刺激起始点后大于 300 ms），汉语学习者均未形成神经层面的范畴感知。这一发现在最新的脑电研究（Yu et al.，2019；Xi et al.，2021）中也得到了进一步支持，即发现汉语学习者在前注意阶段进行自动的声音处理，而不是语音（范畴化）处理。值得注意的是，Xi 等人（2021）还发现较高水平的汉语学习者（HSK 6 级）在注意加工阶段的 P3b（P300 的亚成分）响应在类别间偏差刺激响应大于类别内响应，形成了一定的范畴化加工，可见声调音位表征的形成与学习者的汉语熟练程度也有密切关系。

综上所述，尽管汉语学习者在行为实验中表现出类似汉语母语者的声调识别模式，其神经层面很难同步形成声调的音位表征。尤其在神经加工的早期（前注意）阶段，即便是汉语水平较高的学习者难以进行自动化的语音范畴神经表征。在汉语教学领域的未来研究中，仍需从神经层面出发探索学习者如何有效形成声调音位表征这一关键问题。

3. 汉语学习者声调感知的困难及相关训练方法

3.1 汉语学习者声调感知的困难

在教学实践中，汉语学习者的声调加工训练是重要的教学内容。目前的行为学研究指出，即便是达到高水平的汉语学习者，其在多种行为任务表现上仍然存在很大的困难（Pelzl et al.，2018、2019、2020、2021）。例如，平均十年汉语学习时长的高水平学习者仅在孤立音节声调判别上达到与母语者相近的水平，而无

法在更复杂的语境中利用声调线索进行词汇识别（Pelzl et al.，2018）。在神经层面，当高水平汉语学习者需要利用声调进行词汇辨别或图词匹配任务时，其脑电活动中没有产生由声调伪词引发的 N400 成分（主要用来探测语义违反和非目标预期）及语音失匹配负波（Phonological Mismatch Negativity，PMN）（Pelzl et al.，2020、2021）；在更为复杂的句子语境中，高水平汉语学习者同样没有出现对声调伪词的 N400 响应（Pelzl et al.，2018）。

高水平汉语学习者声调感知的困难可以从音位表征的角度进行解释：声调感知需要两个条件，第一是能够感知音高差异并将这些差异与声调范畴建立联系，第二，也是更为重要的条件，用词汇的心理表征去编码声调并存储于长时记忆中以备将来使用（Pelzl et al.，2019）。高水平学习者并未在神经层面形成声调范畴对应的音位表征，因而不能自动化地利用声调线索检索汉语词条（张林军，2013）。

3.2 知觉训练和手势教学促进声调习得

目前，为了提高汉语学习者的声调加工能力，汉语声调教学大多采用模仿、跟读等方法。但这些传统方法对于声调轮廓（音高走势）和范畴感知没有明显帮助（张林军，2010c）。近年研究发现，知觉训练和手势教学等新的教学手段能够帮助学习者提高声调感知能力（孙悦等，2013；于晓敏等，2014；Lu et al.，2015；邓丹等，2017；洪炜等，2019）。

在知觉训练方面，孙悦等（2013）对日本学生（1-12 个月汉语学习）进行适应性和高变异语音知觉训练，发现两种知觉训练法使得日本学生对阳平/上声自然音节和连续体的听辨成绩提高。于晓敏等（2014）在孙悦等（2013）的研究基础上，对初中级日本学生进行知觉训练，发现初级学生在阳平/上声自然音节和连续体听辨上有明显提高，而中级水平学生由于已经形成一定的范畴感知模式，在连续体听辨上只有部分学生得到提升。Lu 等（2015）比较了感知训练（听声调刺激→判断调类→答案反馈）和感知-产出训练（要求模仿声调刺激）对英语母语者的训练效果，发现两种训练方法都使得英语母语者的声调识别成绩得到提升。邓丹、林雨菁（2017）同样发现各国留学生在接受知觉训练后声调听辨及产出成绩明显提高。

在手势教学方面，研究主要分为被动观看他人打手势和自己打手势结合跟读或视听等方法两种方向。贾琳等（2013）考察了学习者被动观看他人手势动作加跟读的感知效果，发现该方法能够有效促进无汉语经验学习者的声调感知。洪炜等（2019）指导学习者自己打手势加视听跟读，发现无论学习者是否具有声调母语背景，该方法对学习者的声调感知和产出有较好的效果。

可见，对于汉语教学来说，合理增加知觉训练和手势教学结合视听跟读等训练能够有效提高汉语学习者对声调的感知能力。而对于已经形成一定范畴化感知的中高级汉语学习者，还需要继续探索更为有效的声调训练方法。

4. 成人汉语学习者的神经可塑性

从神经机理上，探讨成人汉语学习者声调习得过程中的神经可塑性问题是研究声调感知训练背后脑机制的重要切入点。一方面，语言习得的关键期假说（critical period hypothesis）（Johnson & Newport，1989；Long，1990）认为，人类青春期伴随着大脑神经可塑性的丧失，从而导致语言学习能力的下降；另一方面，有关成人大脑皮层可塑性的研究表明，大脑皮层表征的可塑性贯穿整个生命历程（Van Turennout et al.，2000）。近年来，对大脑可塑性这一神经机理问题的考察也贯穿在汉语学习者声调习得脑机制的研究中。

例如，Wang 等人（2003）利用 fMRI 手段记录汉语初学者（接受一学期汉语学习的英语母语者）的大脑结构数据，发现在经过短期声调训练后大脑某些区域激活体积明显增大（如韦尼克区）并且出现新的被激活的区域以服务于声调信息加工。Wong 等人（2007）随后进一步发现，成功接受声调训练的学习者大脑左侧颞上区，尤其后部颞上回（superior temporal gyrus）显著激活。这些结果表明，成人二语学习者的大脑皮质具有一定的神经可塑性，该观点同样得到近些年的其他神经影像学研究的支持（Yang et al.，2015；Lee et al.，2017；Yang & Li，2019；Qi et al.，2019）。

Lee 等人（2017）利用脑磁图（MEG）技术，对汉语初学者进行短期语境对话训练并记录被试训练前后辨别声调连续体的神经活动，发现被试在训练后大脑左半球相较右半球出现更为显著的 MMNm（MMN 在脑磁上的体现）效应，对阴平/上声连续体的感知在左侧颞横回（Heschl’s gyrus）和左侧岛叶（insula）的 MMNm 效应显著大于阳平/上声连续体。这说明，对于较容易辨别的调类通过训练可以使学习者感知到更多的语言特征；这种类似汉语母语者的左侧化语言加工模式同样表明，成人汉语习得者通过短期训练促进了大脑神经的功能重构。

在功能磁共振成像（fMRI）研究中，Yang 等人（2015）对英语母语者进行为期六周的汉语声调伪词训练，发现接受训练者在声调辨别实验中与未接受训练者相比，大脑双侧颞中回（middle temporal gyrus）后部和角回（angular gyri）区域激活增加，且右半球某些区域激活减少。值得注意的是，左侧颞上回（superior temporal gyrus）后部和左侧小脑（cerebellum）激活较小，这与 Wong 等人（2007）的发现有所差异。后续，Yang & Li（2019）再次对英语母语者进行为期六周的汉语词汇训练，学习者学习能力与左颞横回、左壳核（putamen）、右侧顶上小叶

（superior parietal lobule）和双侧舌回（lingual gyri）区域的激活程度呈正相关。Qi 等人（2019）对英语母语者进行为期一月的汉语声调训练，对比训练前后的大脑激活区域，发现训练后大脑区域伴随着左侧额下回（inferior frontal gyrus）和左侧顶上小叶激活增强以及右侧区域（包括额下回）激活的减弱。以上发现揭示了成人汉语学习者在接受相关训练后大脑皮层网络发生了一系列显著的变化，表明大脑具有一定的神经可塑性。

由此可见，即使错过语言学习的关键期，成人汉语学习者仍然可以通过后期声调训练和课堂学习以重塑相关脑区的活动，增强对声调的感知能力，并逐步建立起特定的汉语语言系统的神经表征体系。

5. 总结与展望

综上，汉语学习者通过短期声调训练和长期自然课堂学习提高声调感知能力，并在行为层面形成类似汉语母语者的范畴感知模式，但其神经层面很难同步形成声调的音位表征。在教学实践上，针对水平汉语学习者在复杂语境中进行声调感知的困难，知觉训练和手势教学法是提升学习者声调感知的有效教学手段。在神经机理上，成人汉语学习者大脑在错过语言关键期后仍然具有一定的神经可塑性，这为汉语教学中探索声调感知训练方法提供了脑神经层面的证据。

目前使用神经科学领域的技术研究汉语作为第二语言的习得仍为少数，且大多集中于考查不同母语背景者对汉语声调加工的脑神经活动模式。近几年，研究者主要关注汉语学习者范畴感知背后的神经表征以及各种影响因素（如年龄、音乐经验、母语经验、目的语经验、音节结构等）。在未来的研究中，有必要使用脑成像技术继续对这些在行为表现上与母语者相似的被试进行脑区活动的溯源与定位，探索有效形成声调音位表征的神经基础。此外，基于成人学习者的大脑仍具有一定的神经可塑性，在未来的研究中以纵向追踪的方式考察不同教学法训练前后学习者神经活动的变化将是一个重要的研究方向，以此进一步探索和发展汉语教学中的声调训练手段及效果。

参考文献

毕　芳（2011）欧美留学生汉语声调学习中的难点——阳平——阳平课堂教学的实践方法及其实证考察报告，《现代语文（语言研究版）》第 7 期。

陈　默（2011）无声调语言母语者汉语声调范畴习得的实验研究，《华文教学与研究》第 4 期。

程　潇（2010）外国留学生习得汉语声调的难点及教学策略，《现代语文（语言研究版）》第 9 期。

邓　丹、林雨箐（2017）感知训练方法在汉语语音教学中的应用研究，《云南师范大学学报（对外汉语教学

与研究版）》第 3 期。

高玉娟、李宝贵（2006）韩国留学生汉语声调习得偏误的声学研究，《云南师范大学学报》第 1 期。

韩 明（2005）越南留学生声调偏误分析及教学对策，《玉林师范学院学报》第 2 期。

洪 炜、何文华、黄亿雯（2019）手势对初级汉语二语者声调感知与产出的影响，《汉语学习》第 6 期。

贾 琳、王建勤（2013）视觉加工对英语母语者汉语声调产出的影响，《华文教学与研究》第 4 期。

林 焘（1996）语音研究和对外汉语教学，《世界汉语教学》第 3 期。

孙 悦、张劲松、解焱陆、曹 文（2013）日本学生汉语阳平和上声的知觉训练效果的初步分析，《清华大学学报（自然科学版）》第 6 期。

谭董妍（2010）以美国学生习得汉语声调为例探析对外汉语声调教学，《文学界（理论版）》第 9 期。

王功平（2015）西班牙语区留学生普通话双音节声调感知实验，《华文教学与研究》第 3 期。

王 燕（2016）对外汉语中高级水平声调教学策略研究——以韩、美、日汉语学习者为例，《语文建设》第 18 期。

王韫佳、李美京（2011）韩语母语者对普通话阳平和上声的知觉，《语言教学与研究》第 1 期。

吴 倩、王韫佳（2018）声调的范畴知觉及其神经机制，《心理科学进展》第 1 期。

姚 勇、刘 莎（2012）不同汉语水平的中亚留学生汉语声调感知实验及成因分析，《云南师范大学学报（对外汉语教学与研究版）》第 2 期。

易 斌、吴永明、阿丽达（2021）泰国学习者汉语单字调习得过程及特点的实验研究，《语言教学与研究》第 6 期。

于晓敏、孙 悦、张劲松、解焱陆、曹 文（2014）知觉训练对初中级日本学生感知汉语声调的训练效果分析，《汉语应用语言学研究》第 3 期。

张锦玉（2019）东南亚华裔学生阳平、上声的知觉研究，《海外华文教育》第 1 期。

张林军（2010a）母语经验对留学生汉语声调范畴化知觉的影响，《华文教学与研究》第 2 期。

张林军（2010b）日本留学生汉语声调的范畴化知觉，《语言教学与研究》第 3 期。

张林军（2010c）知觉训练在第二语言语音习得中的作用——兼论对外汉语的语音习得和教学研究，《云南师范大学学报（对外汉语教学与研究版）》第 1 期。

张林军（2013）美国留学生汉语声调感知的左右耳优势，《语言教学与研究》第 2 期。

Bidelman, M. Gavin & Chia-Cheng Lee (2015) Effects of language experience and stimulus context on the neural organization and categorical perception of speech. *NeuroImage* 120: 191 – 200.

Chan, K.W. Ricky & Janny H.C. Leung (2020) Why are lexical tones difficult to learn? *Studies in Second Language Acquisition* 42(1): 33 – 59.

Bharath, Ananthanarayan Krishnan & Jackson T. Gandourr (2007) Mismatch negativity to pitch contours is influenced by language experience. *Brain Research* 1128: 148 – 156.

Chen, Fei, Gang Peng, Nan Yan & Lan Wang (2016) The development of categorical perception of Mandarin tones

in four- to seven-year-old children. *Journal of Child Language* 44(6): 1413 – 1434.

Feng, Yan & Gang Peng (2023) Development of categorical speech perception in Mandarin speaking children and adolescents. *Child Development* 99(1): 28 – 43.

Gandour, Jack, Yisheng Xu, Donald Wong, Mario Dzemidzic, Mark Lowe, Xiaojian Li & Yunxia Tong (2003) Neural correlates of segmental and tonal information in speech perception. *Human Brain Mapping* 20: 185 – 200.

Hallé, A. Pierre, Yueh-Chin Chang & Catherine T. Best (2004) Identification and discrimination of Mandarin Chinese tones by Mandarin Chinese vs. French listeners. *Journal of Phonetics* 32(3): 395 – 421.

Johnson, S. Jacqueline & Elissa L. Newport (1989) Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cognitive Psychology* 21(1): 60 – 99.

Klein, Denise, Robert J. Zatorre, Brenda Milner & Viviane Zhao (2001) A cross-linguistic PET study of tone perception in Mandarin Chinese and English speakers. *NeuroImage* 13(4): 646 – 653.

Krishnan, Ananthanarayan, Yisheng Xu, Jackson Gandoura & Peter Cariani (2005) Encoding of pitch in the human brainstem is sensitive to language experience. *Cognitive Brain Research* 25(1): 161 – 168.

Kuhl, K. Patricia (2004) Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience* 5: 831–843.

Lee, R.-W. Rose, Chun-Hsien Hsu, Sheng-Kai Lin, Denise Hsien Wu & Ovid J.-L. Tzeng (2017) Learning transforms functional organization for Mandarin lexical tone discrimination in the brain: Evidence from a MEG experiment on second language learning. *Journal of Neurolinguistics* 42: 124 – 139.

Liberman, M. Alvin, Katherin S. Harris, Howard S. Hoffman & Belver C. Griffith (1957) The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology* 54(5): 358 – 368.

Long, H. Michael (1990) Maturational constraints on language development. *Studies in Second Language Acquisition* 12(3): 251 – 285.

Lu, Shuang, Ratree Wayland & Edith Kaan (2015) Effects of production training and perception training on lexical tone perception - A behavioral and ERP study. *Brain Research* 1624: 28 – 44.

Ma, Junzhou, Jiaqiang Zhu, Yuxiao Yang & Fei Chen (2021) The development of categorical perception of segments and suprasegments in Mandarin--speaking preschoolers. *Frontiers in Psychology* 12: 1 – 15.

Mattock, Karen & Denis Burnham (2006) Chinese and English infants' tone perception: Evidence for perceptual reorganization. *Infancy* 10: 241 – 265.

Mattock, Karen, Monika Molnar, Linda Polka & Denis Burnham (2008) The developmental course of lexical tone perception in the first year of life. *Cognition* 106(3): 1367 – 1381.

Pelzl, Eric (2019) What makes second language perception of Mandarin tones hard? *Chinese as a Second Language* 54(1): 51 – 78.

Pelzl, Eric, Ellen F. Lau, Taomei Guo &Robert DeKeyser (2018) Advanced second language learners' perception of lexical tone contrasts. *Studies in Second Language Acquisition* 41(1): 59 – 86.

Pelzl, Eric, Ellen F. Lau, Taomei Guo &Robert DeKeyser (2020) Even in the best-case scenario L2 learners have persistent difficulty perceiving and utilizing tones in Mandarin: findings from behavioral and event-related

potentials experiments. *Studies in Second Language Acquisition* 43(2): 268 – 296.

Pelzl, Eric, Ellen F. Lau, Taomei Guo &Robert M. DeKeyser (2021) Advanced second language learners of mandarin show persistent deficits for lexical tone encoding in picture-to-word form matching. *Frontiers in Communication* 6: 1 – 18.

Peng, Gang, Hong-Ying Zheng, Tao Gong, Ruo-Xiao Yang, Jiang-Ping Kong & William S.-Y. Wang (2010) The influence of language experience on categorical perception of pitch contours. *The Journal of Phonetics* 38(4): 616 – 624.

Qi, Zhenghan, Michelle Han, Yunxin Wang , Carlo de los Angeles, Qi Liu b, Keri Garel, Ee San Chen, Susan Whitfield-Gabrieli, John D.E. Gabrieli & Tyler K. Perrachione (2019) Speech processing and plasticity in the right hemisphere predict variation in adult foreign language learning. *NeuroImage* 192: 76 – 87.

Shen, Guannan & Karen Froud (2016) Categorical perception of lexical tones by English learners of Mandarin Chinese. *The Journal of the Acoustical Society of America* 140: 4396 – 4403.

Shen, Guannan & Karen Froud (2018) Electrophysiological correlates of categorical perception of lexical tones by English learners of Mandarin Chinese: an ERP study. *Bilingualism: Language and Cognition* 22(2): 253 – 265.

Shen, Xiaonan (1989) Interplay of the four citation tones and intonation in Mandarin Chinese. *Journal of Chinese Linguistics* 17(1): 61 – 74.

Studdert-Kennedy, Michael & Donald Shankweiler (1970) Hemispheric specialization for speech perception. *The Journal of the Acoustical Society of America* 48: 579 – 594.

Van Turennout, Miranda, Timothy Ellmore & Alex Martin (2000) Long-lasting cortical plasticity in the object naming system. *Nature Neuroscience* 3: 1329 – 1334.

Wang, Yue & Patricia K. Kuhl (2003) Evaluating the “critical period” hypothesis: Perceptual learning of Mandarin tones in American adults and American children at 6, 10 and 14 years of age. In *Proceedings of the 15th International Congress of Phonetic Sciences*, 1537 – 1540. Barcelona, Spain: Futurgraphic.

Wang, Yue, Joan A. Sereno, Allard Jongman & Joy Hirsch (2003) fMRI evidence for cortical modification during learning of Mandarin lexical tone. *Journal of Cognitive Neuroscience* 15(7): 1019 – 1027.

Wang, Yue, Michelle M. Spence, Allard Jongman & Joan A. Sereno (1999) Training American listeners to perceive Mandarin tones. *The Journal of the Acoustical Society of America* 106: 3649 – 3658.

Wong, C.M. Patric & Tyler K. Perrachione (2007) Learning pitch patterns in lexical identification by native English-speaking adults. *Applied Psycholinguistics* 28(4): 565 – 585.

Wong, C.M. Patric, Tyler K. Perrachione & Todd B. Parrish (2007) Neural characteristics of successful and less successful speech and word learning in adults. *Human Brain Mapping* 28: 995 – 1006.

Xi, Jie, Hongkai Xu, Ying Zhu, Linjun Zhang, Hua Shu & Yang Zhang (2021) Categorical perception of Chinese lexical tones by late second language learners with high proficiency: Behavioral and electrophysiological measures. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 64(12): 4695 – 4704.

Xu, Yisheng, Jackson T. Gandour & Alexander L. Francis (2006) Effects of language experience and stimulus complexity on the categorical perception of pitch direction. *Journal of the Acoustical Society of America* 120: 1063 – 1074.

Yang, Jing & Ping Li (2019) Mechanisms for auditory perception: A neurocognitive study of second language learning of Mandarin Chinese. *Brain Sciences* 9(6): 139.

Yang, Jing, Kathleen Marie Gates, Peter Molenaar & Ping Li (2015) Neural changes underlying successful second language word learning: An fMRI study. *Journal of Neurolinguistics* 33: 29 – 49.

Yu, Keke, Li Li, Yuan Chen, Yacong Zhou, Ruiming Wang, Yang Zhang & Ping Li (2019) Effects of native language experience on Mandarin lexical tone processing in proficient second language learners. *Psychophysiology* 56: e13448.

Zhang, Yajing, Linjun Zhang, Hua Shu, Jie Xi, Han Wu, Yang Zhang & Ping Li (2012) Universality of categorical perception deficit in developmental dyslexia: An investigation of Mandarin Chinese tones. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 53: 874 – 882.

Zhang, Yang & Yue Wang (2007) Neural plasticity in speech acquisition and learning. *Bilingualism: Language and Cognition*, 10(2): 147 – 160.

Zhao, T. Christina & Patricia K. Kuhl (2015) Effect of musical experience on learning lexical tone categories. *The Journal of Acoustical Society of America*, 137: 1452 – 1463.

The application of electrophysiological and neuroimaging techniques in Chinese as a Second Language (CSL) tone acquisition: enlightenment on Chinese language education

Abstract Tone acquisition, which is one of the major difficulties in Chinese as Second Language (CSL) acquisition, has become an important research field in the teaching of Chinese. In recent years, with the development of electrophysiological and neuroimaging techniques, new progress has been made in the empirical research of CSL tone acquisition. Firstly, CSL learners exhibit the pattern of categorical perception similar to native speakers through short-term tone training or classroom learning at the behavioral level, but it is difficult for them to form phonemic representation at the neural level. Secondly, CSL learners have difficulties in tone acquisition which is manifested in their weaker ability to use tonal cues in lexical decision. Perceptual training and gesture teaching can effectively promote learners' acquisition of tone in CSL teaching. Finally, neuroplasticity maintains in adult CSL learners during the language training. This article summaries recent empirical research using the behavioral measurement, electroencephalography (EEG), magnetoencephalography (MEG) and functional magnetic resonance imaging (fMRI) techniques in CSL tone acquisition, and discusses the critical research questions and future directions in the teaching of Chinese as a foreign language.

Keywords CSL acquisition, tone perception, M/EEG, fMRI, neural plasticity